

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra automatizační techniky a řízení

**Podpora výuky předmětu Základy  
automatizace**

**Support for Teaching Course of Control Systems  
Fundamentals**

Student:

Jan Šidlo

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.

Ostrava 2017

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Šidlo**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3902R001 Aplikovaná informatika a řízení  
Téma: Podpora výuky předmětu Základy automatizace  
Support for Teaching Course of Control Systems Fundamentals  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s laboratorním modelem ventilátoru, popište jeho hardwarové a softwarové vybavení, ověřte jeho funkčnost.
2. Na základě změřené přechodové charakteristiky sestavte matematický popis systému a ověřte jeho správnost na reálném zařízení.
3. Navrhněte konvenční regulátory pomocí vybraných metod a ověřte jejich správnost.
4. Vytvořte návody do cvičení pro samostatnou práci s modelem v českém i anglickém jazyce.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte další směr řešení.

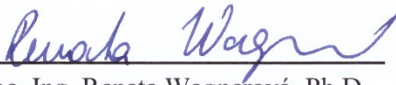
### Seznam doporučené odborné literatury:

DORF, R. C. & BISHOP, R. H. Modern Control Systems. Addison-Wesley: Harlow England 1998. ISBN 0-201-30864-9.  
HÝL, M. Návrh a realizace řízení modelu Batyskaf. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 2013. 41 stran. Bakalářská práce, vedoucí: Wagnerová, R.  
LOS, J. Analýza a syntéza vybraného technologického procesu. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 2007. Bakalářská práce, vedoucí: Wagnerová, R.  
VÍTEČKOVÁ, M., VÍTEČEK, A. Základy automatické regulace. 2. přepracované vydání. Skripta FS VŠB-TU Ostrava, 246 str. 2008. ISBN 978-80-248-1924-2.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016  
Datum odevzdání: 15.05.2017

  
doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

## Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было с́еднано, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было с́еднано, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

Jan Šidlo

Jana Čapka 3098

Frýdek-Místek

738 01

# **Anotace**

ŠIDLO, J. Podpora výuky předmětu Základy automatizace. Ostrava: ATR – 352 VŠB – TUO, 2017. Bakalářská práce, vedoucí: Wagnerová, R.

Tato práce se zabývá popisem laboratorního modelu ventilátoru. U modelu bylo popsáno jeho softwarové a hardwarové vybavení. Pomocí aproximace změřené přechodové charakteristiky byla provedena identifikace soustavy a sestaven matematický model. Dále byly změřeny přechodové charakteristiky pro 5 různých budících napětí vstupu. Z ustálených stavů těchto charakteristik byla získána statická charakteristika. Pro identifikovanou soustavu byl navržen a seřízen regulátor. Regulace byla ověřena simulačním programem i na reálném modelu. Nakonec byl sestaven návod do cvičení v českém a anglickém jazyce.

Klíčová slova: identifikace, matematický model, regulátor, ventilátor

# **Annotation**

ŠIDLO J. Support for Teaching Course of Control Systems Fundamentals. Ostrava: Department of Control Systems and Instrumentation, Technical University of Ostrava, 2017. Bachelor Thesis, supervisor: Wagnerová, R.

This bachelor thesis deals with the description of the air fan laboratory model. There was described software and hardware equipment. Identification of the plant was obtain by approximation of measured transfer response and was obtain mathematical model of plant. There was measured 5 transfer response for different input voltages. From steady state of those transfer response was obtain static response. For this planet was designed and tuned controller. The regulation was verified by simulation program and on real model. There was designed guide for practical exercise at the end.

Keywords: identification, mathematical model, controller, air fan

# Obsah

Seznam použitých zkratek a symbolů .....	4
Úvod .....	6
1 Popis modelu ventilátoru .....	7
2 Identifikace modelu .....	16
3 Návrh regulátoru .....	23
3.1 Návrh regulátoru metodou požadovaného modelu .....	23
3.2 Návrh regulátoru metodou SIMC .....	24
3.3 Ověření PID regulace .....	26
4 Závěr .....	27
Použitá literatura .....	29
Přílohy .....	30

## Seznam použitých zkratek a symbolů

### Symboly

$e$	odchylka naměřené hodnoty
$G_R(s)$	přenosu regulátoru
$G_S(s)$	přenos regulované soustavy
$h(t)$	přechodová funkce, grafické vyjádření $h(t)$ = přechodová charakteristika
$h_S(t)$	přechodová funkce regulované soustavy
$h_S(\infty)$	ustálený stav přechodové funkce regulované soustavy
$k_I$	zesílení
$k_p$	zesílení regulátoru
$S_e$	přiléhavost funkcí
$T_I, T_2$	časové konstanty soustavy
$T_d$	dopravní zpoždění
$T_D$	derivační časová konstanta regulátoru
$T_I$	integrační časová konstanta regulátoru
$u(t)$	akční veličina
$u(\infty)$	ustálená hodnota akční veličiny
$y(t)$	regulovaná veličina
$y(\infty)$	regulovaná veličina v ustáleném stavu

### Zkratky

FFT	fast Fourier transformation (rychlá Fourierova transformace)
HW	hardware (pevná část zařízení)
IMC	internal model control – regulace vnitřním modelem
IR	infra-red – infra červené záření
LED	light-emitting diode – svítivá dioda
NI	National Instruments
PC	personal computer – osobní počítač
PID	proportional–integral–derivative controller – proporcionálně integračně derivační regulátor

SIMC SIMple Control nebo Skogestad IMC

USB universal serial bus

### Jednotky

kS/s kilo samples per second – tisíc vzorků za sekundu

RPM revolutions per minute – otáček za minutu

s sekunda

V volt



## Úvod

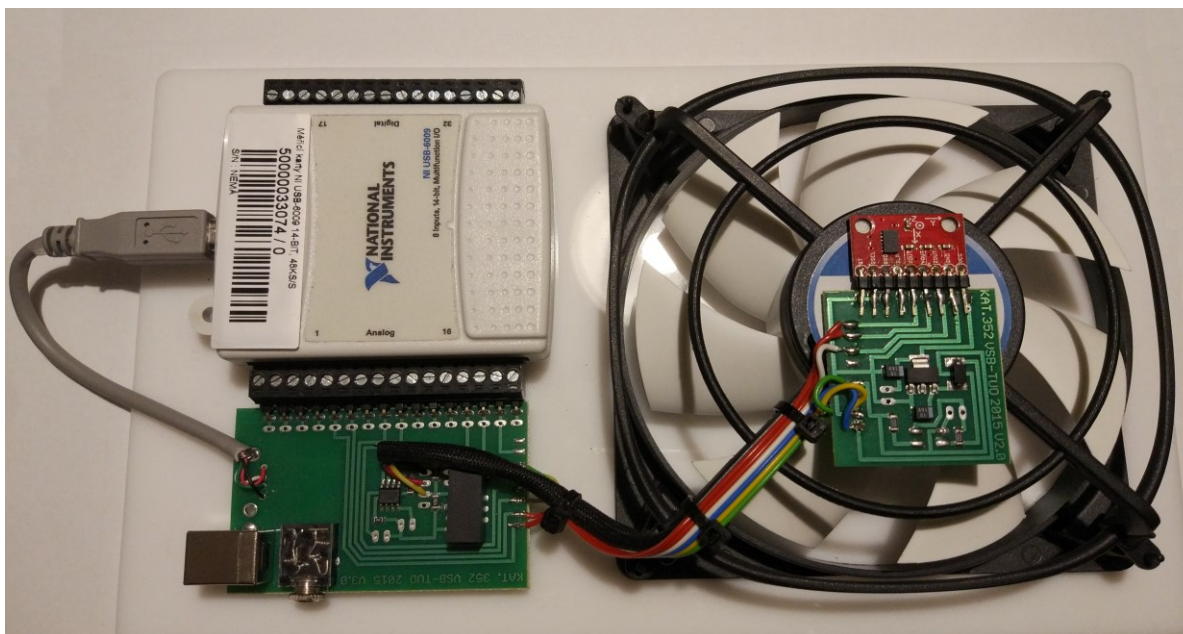
V praxi, ve výrobních odvětvích, se klade velký důraz na dokonalou znalost technologického procesu a jeho řízení. Čím je řízení lepší, tím se daří snižovat náklady. S rozvojem výpočetní techniky se daří rozvíjet i modelování a simulace technologických procesů případně i prediktivní řízení. K těmto cílům je však zapotřebí sestavit co nejvěrohodnější matematické modely, které pomůžou navrhnout kvalitní a přesné regulátory, ale i provádět simulace. Zaměstnavatelé tyto charakteristické dovednosti zaměstnanců čím dál víc vyžadují. Proto je třeba studenty těmito dovednostmi vybavit, ať mají větší šanci uspět na trhu práce.

Úkolem této práce je vytvořit podporu výuky předmětu Základy automatické. V tomto předmětu se studenti seznamují se základními principy automatického řízení. Tohoto cíle bude dosaženo praktickým seznámením se s modelem ventilátoru. Bude popsána jeho hardwarová část a softwarové vybavení. Na tomto modelu bude změřena přechodová charakteristika, která bude aproximována matematickým modelem a porovnána přesnost s reálným zařízením. Dále bude navržen konvenční regulátor pomocí vybraných metod. Funkce regulátoru bude verifikována v simulačním programu a na modulu a též na reálném modelu.

Součástí práce jsou i návody do cvičení v českém a anglickém jazyce. Ty budou k nalezení v přílohách.

# 1 Popis modelu ventilátoru

Model (*obr. 1*) slouží jako pomůcka pro hromadnou výuku studentů a demonstrují se na ní základní principy automatického řízení. Tomuto účelu odpovídá i robustnost modelu a je pamatováno i na to, že student si mnohdy nevybaví potřebnou teoretickou přípravu k problematice a postupuje metodou pokus omyl, která by mohla vést k poškození modelu nebo úrazu studenta.



*Obr. 1 – Model ventilátoru*

Hardwarová část obsahuje ventilátor o průměru 11 cm, na kterém je připevněný akcelerometr, multifunkční kartu National Instruments USB-6009 a přídatná elektronika, která chrání multifunkční kartu. Multifunkční karta slouží jako vstupně výstupní analogově digitální převodník s 14bitovou přesností a možností snímat rychlostí až 48kS/s (kilo samples per second – tisíc vzorků za sekundu). Tento převodník umožňuje obslužnému software přístup ke všem měřeným hodnotám a v opačném směru slouží jako digitálně analogový převodník, který zajišťuje vysílání řídicího napětí do modulu. Tím umožňuje použít obslužnou aplikaci jako PID regulátor, který řídí model a ten je zde použit jako regulovaná soustava. Pro měření otáček je použita optická brána (LED dioda + fototranzistor), která díky mezerám mezi lopatkami poskytne obdélníkový signál, který je přepočítán na otáčky. Napájecí napětí modelu je získáno z USB portu počítače. Toto napětí

spadá do kategorie bezpečné dotykové napětí a díky tomu s ním můžou pracovat i studenti v laboratoři. Pomocí USB rozhraní je model spojen i s řídicím programem.

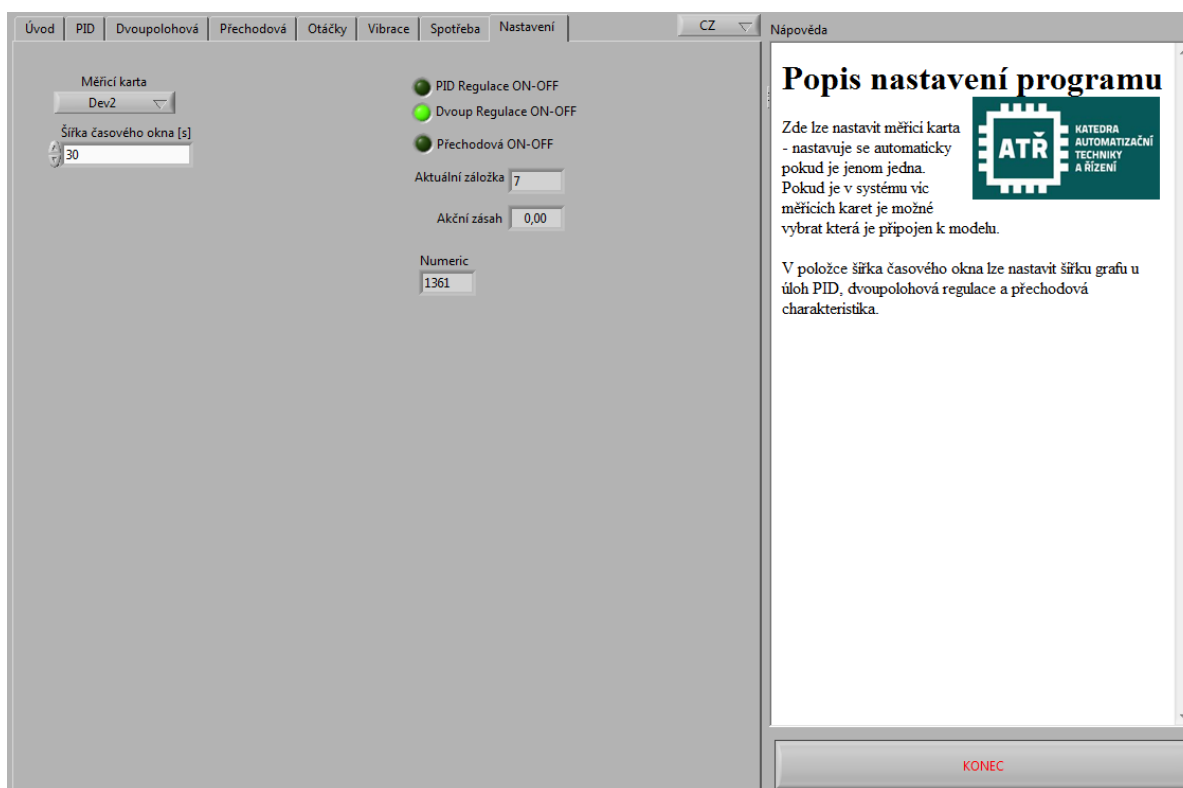
Obslužná aplikace je distribuována jako instalační balíček, který instalací zajistí bezproblémový chod připojeného modelu. Balíček obsahuje všechno potřebné softwarové vybavení, včetně nezbytných ovladačů pro USB rozhraní měřicí karty NI USB-6009. Po připojení tak operační systém bez problémů najde měřicí kartu a aplikace bude fungovat. Pokud nastane nějaký problém a aplikace se nedokáže spojit s modelem, objeví se zpráva patrná na *obr. 2*. Když nastane tento problém, může pomoci přepojení modelu do jiného USB portu počítače nebo přeinstalování celé aplikace.



Obr. 2 – Chybové hlášení při nepřipojeném modelu

Obslužný program je vytvořený ve vývojovém prostředí NI LabVIEW a umožňuje provádět následující akce:

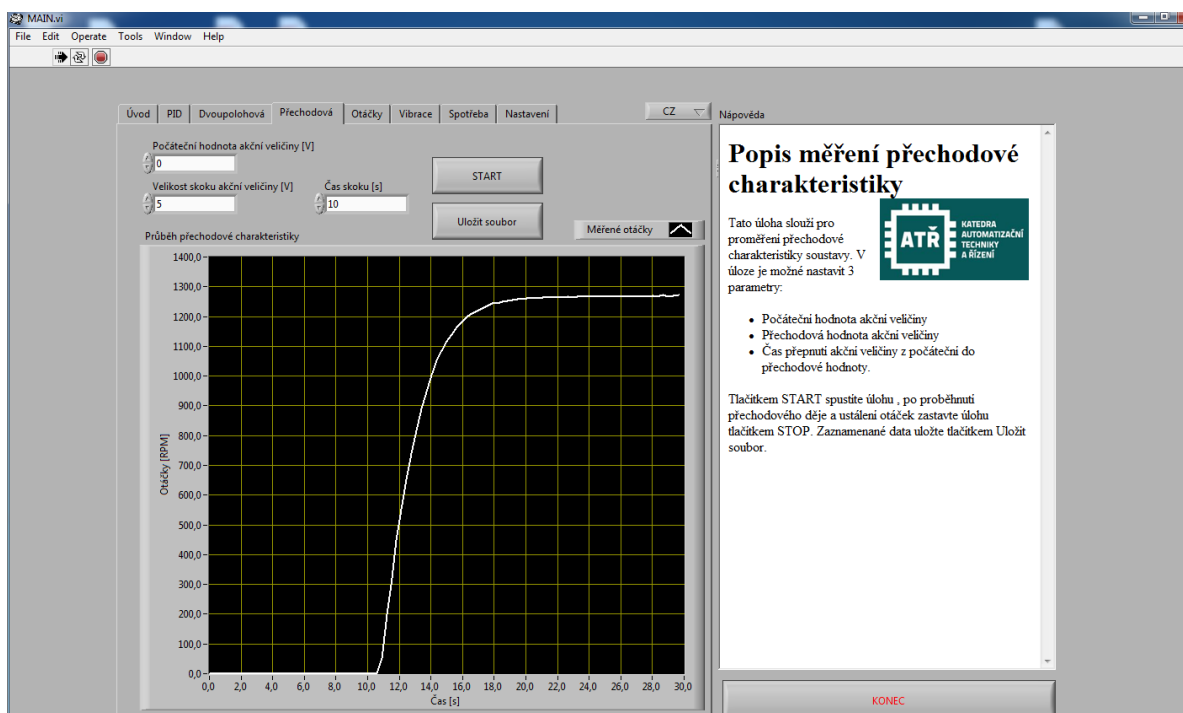
- nastavení aplikace (*obr. 3*)



Obr. 3 – Nastavení programu Ventilátor

V záložce *Nastavení* řídicí aplikace je možno provést jednoduché nastavení programu. Lze zvolit měřicí kartu, která obsluhuje model ventilátoru. Tato volba se provádí automaticky, pouze v případě, že k PC je připojeno více karet, je třeba provést volbu manuálně. Další možností nastavení je šířka časové osy v grafech PID regulace, dvoupolohové regulace a měření přechodové charakteristiky. Jsou zde umístěny indikátory spuštěné PID regulace, dvoupolohové regulace a měření přechodové charakteristiky.

- měření přechodové charakteristiky (obr. 4)

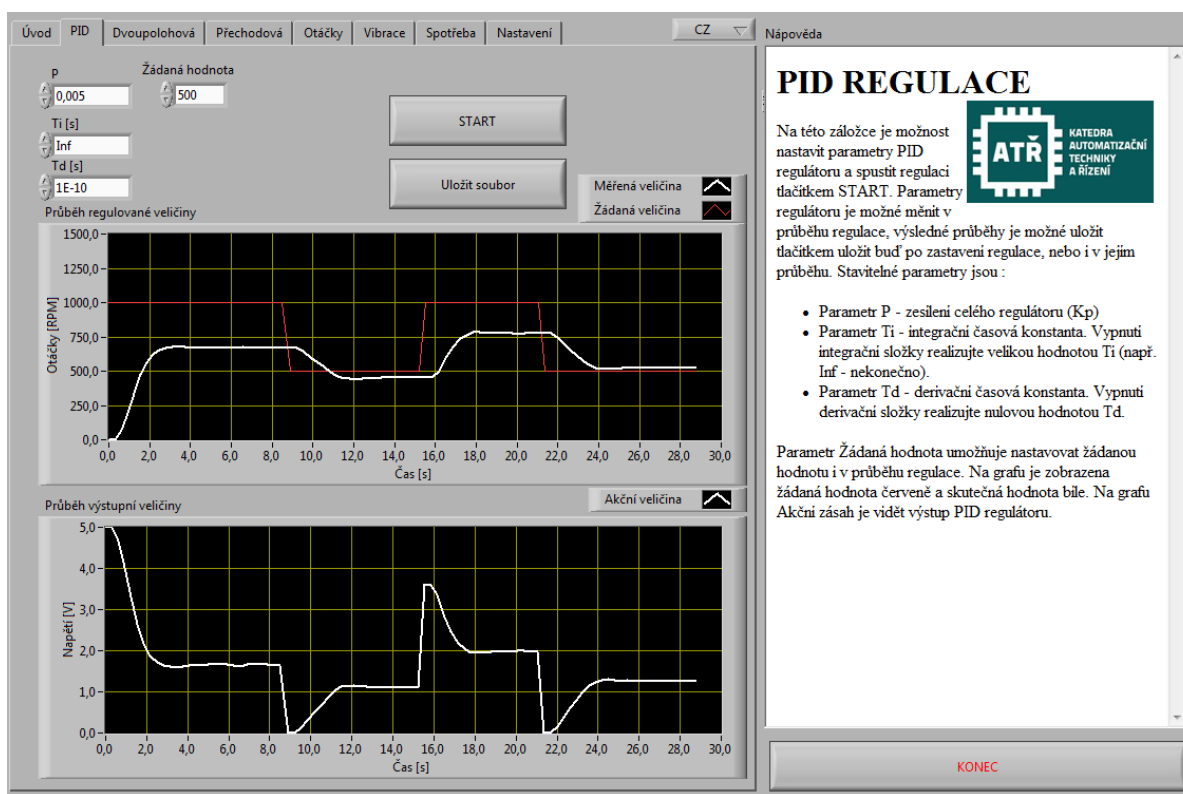


Obr. 4 – Měření přechodové charakteristiky

V záložce *Přechodová* obslužné aplikace je možno nastavovat parametry „Počáteční hodnota akční veličiny [V]“, „Velikost skoku akční veličiny [V]“ a „Čas skoku [s]“. U této úlohy se v praxi ověřuje odezva lineárního dynamického členu na skokovou změnu vstupní veličiny a měří se výstupní veličina  $y(t)$ , jejíž křivka nám díky skokovému buzení vstupu dá přechodovou charakteristiku  $h(t)$ , takže platí, že  $y(t)=h(t)$ . Vstupní napětí je možno nastavit v rozsahu 0 – 5V. Ventilátor se začíná točit od napětí 1,5V, tak doporučuji nastavit nejnižší úroveň napětí na 2V, kdy je jistota, že se ventilátor opravdu bude točit. Při hodnotě 1,5V je ustálená hodnota otáček zhruba 600RPM a při budicím napětí 5V otáčky vystoupají k hodnotě 1300RPM. Měření přechodové charakteristiky provedeme tak, že nastavíme parametry „Počáteční hodnota akční veličiny [V]“ a „Velikost skoku akční veličiny [V]“ na odlišné hodnoty napětí a parametrem „Čas skoku [s]“ stanovíme, v jakém čase od začátku pokusu, dojde ke změně vstupního napětí. Pro první měření doporučuji nastavit parametr „Počáteční hodnota akční veličiny [V]“ na hodnotu 0V a parametr „Velikost skoku akční veličiny [V]“ na hodnotu 5V. Parametr „Čas skoku [s]“ můžeme nastavit libovolně. Tím, že nastavíme maximální hodnotu vstupního napětí, dostaneme přechodovou

charakteristiku, která nám ukáže, jak rychle dosáhne vstupního napětí ustáleného stavu  $h(\infty)$  - budeme mít představu o dynamice soustavy.

- regulace otáček PID regulátorem (*obr. 5*)



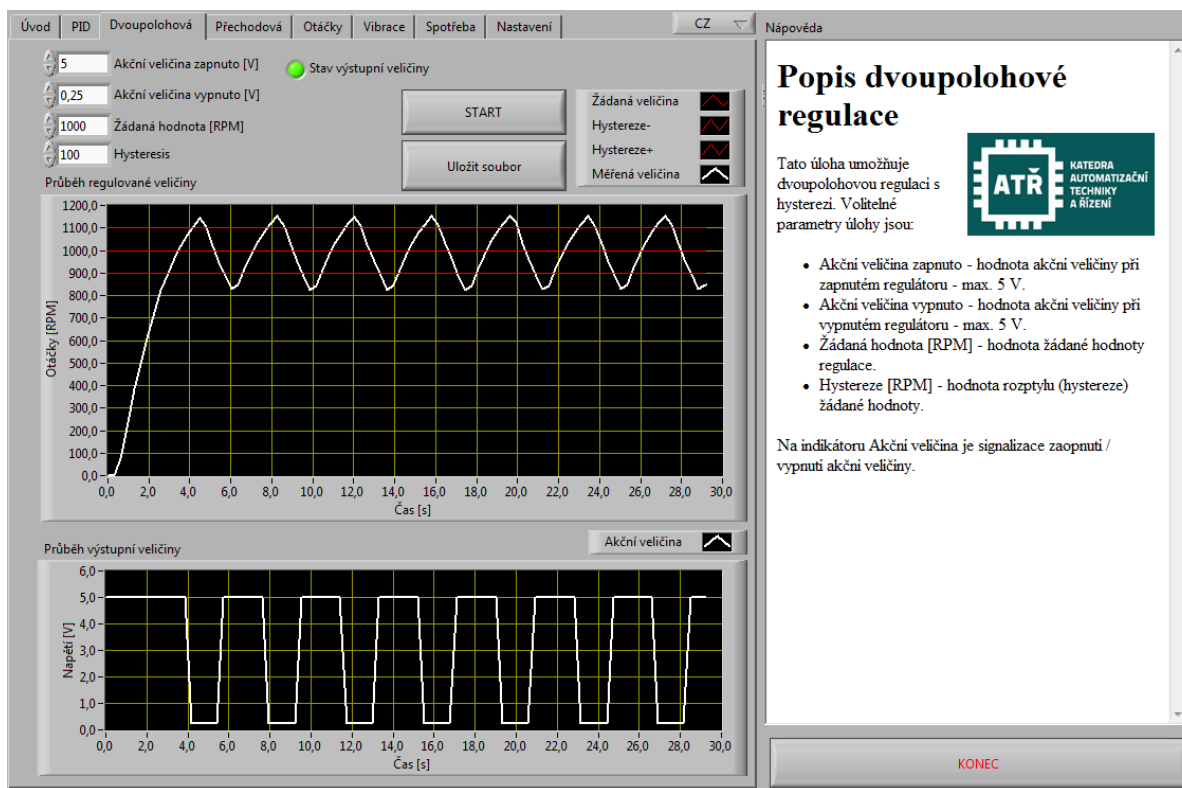
Obr. 5 – Regulace otáček ventilátoru pomocí PID regulátoru

V záložce *PID* řídicí aplikace je možno nastavovat parametry „P“ (zesílení regulátoru -  $k_p$ ), parametr „ $T_i$ “ (integrační časová konstanta - vypnutí integrační složky se provede nastavením hodnoty parametru na nekonečno řetězcem „Inf“), parametr „ $T_d$ “ - derivační časová konstanta (vypnutí derivační složky provedeme nastavením hodnoty 0), parametr „Žádaná hodnota“ (hodnota, na které chceme udržovat otáčky – lze ji měnit i po spuštění úlohy)

U této úlohy si v praxi vyzkoušíme regulaci otáček pomocí PID regulátoru. Dříve než se dostaneme k vlastní regulaci, musíme získat matematický model regulované soustavy (identifikace soustavy) – tímto se budeme zabývat v kapitole 3. Po úspěšné identifikaci provedeme syntézu, kterou získáme vhodný typ regulátoru a jeho parametry (seřízení regulátoru) – kapitola 4.

Seřízením regulátoru chceme dosáhnout stavu, kdy při změně žádané veličiny dojde k okamžité reakci výstupní veličiny. Této představě brání reálné vlastnosti regulované soustavy, která má setrvačnost změny v přenosu vstupního signálu na výstup. Na obrázku 11. je vidět, že se ventilátor, při budícím napětí 5V, roztočí z nulových otáček na maximální za čas okolo 11 sekund.

- regulace otáček dvoupolohovou regulací (obr. 6)



Obr. 6 – Dvoupolohová regulace otáček ventilátoru

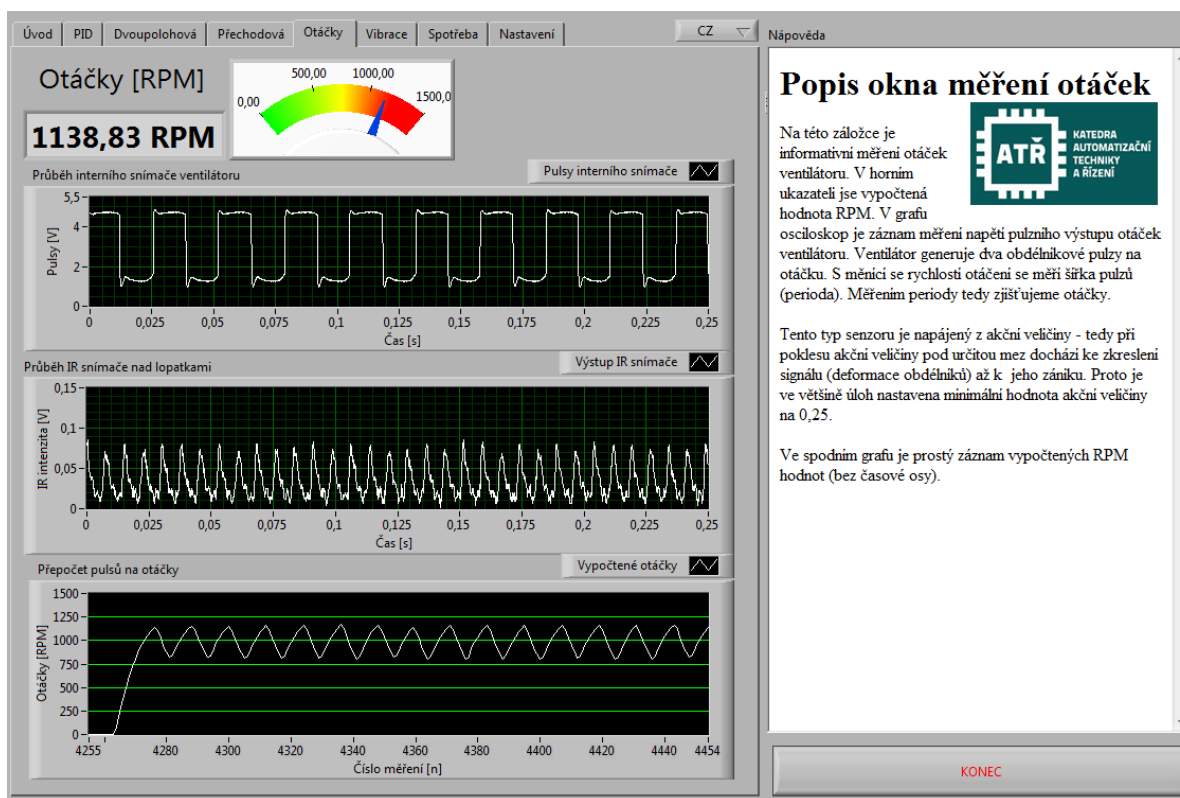
V záložce *Dvoupolohová* řídicí aplikace je možno nastavit parametr „Akční veličina zapnuto [V]“ (hodnota akční veličiny při zapnutém regulátoru - max. 5 V), parametr „Akční veličina vypnuto [V]“ (hodnota akční veličiny při vypnutém regulátoru - max. 5 V), parametr „Žádaná hodnota [RPM]“ (hodnota žádané hodnoty regulace), parametr „Hystereze [RPM]“ (hodnota rozptylu - hystereze - žádané hodnoty).

Dvoustavová regulace (ON/OFF regulace) patří mezi nespojité regulace, kdy se regulování hodnoty regulované veličiny provádí pomocí zapínání a vypínání akčního zásahu. Používá se tam, kde není potřeba udržovat výstupní veličiny na úplně přesné hodnotě – regulace teploty v



místnosti. U této regulace je třeba stanovit vhodnou hysterezi, protože v praxi bývá mnohdy realizována pomocí relé, u kterých velmi časté spínání vede k jeho zničení. Regulátor má zapnutou vstupní veličinu, dokud není dosažena hodnota „Žádaná hodnota“ + „Hystestereze“, poté vstupní veličinu vypne a čeká, dokud nedosáhne hodnoty „Žádaná hodnota“ - „Hystestereze“ a celý proces se opakuje.

- měření otáček (obr. 7)

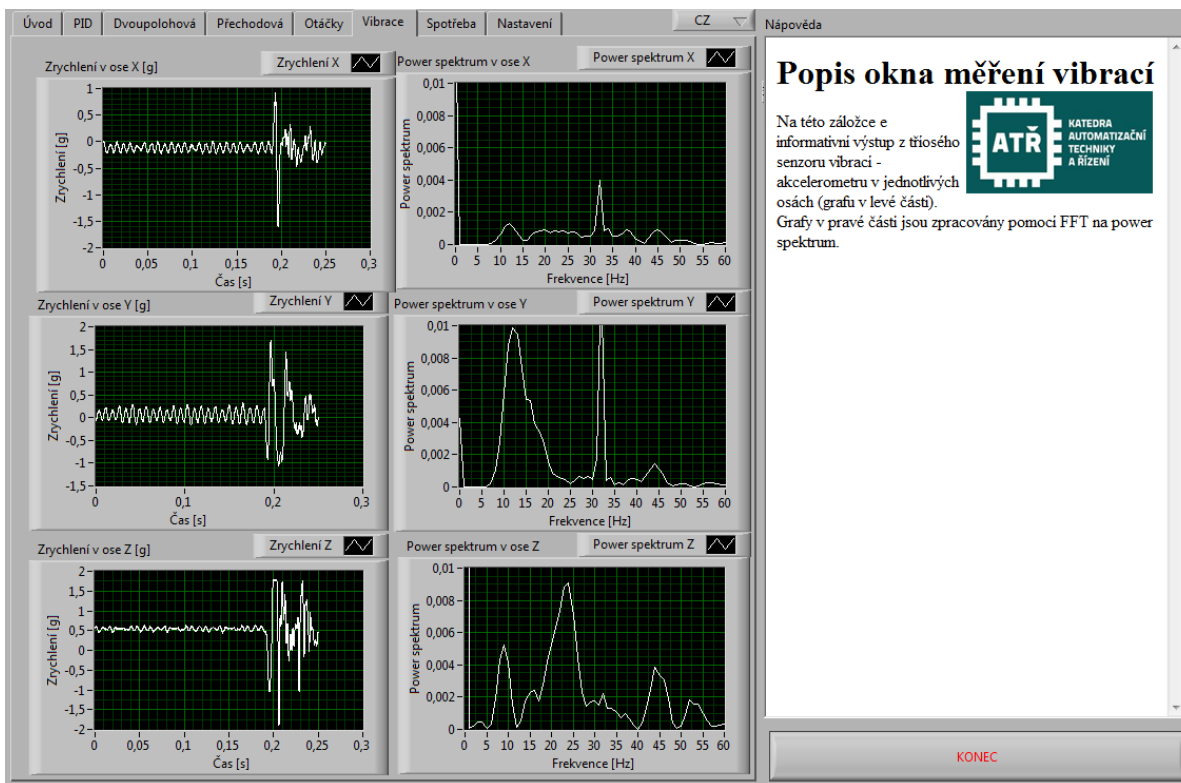


Obr. 7 – Měření otáček ventilátoru

V záložce *Otáčky* obslužné aplikace je prováděna vizualizace naměřených otáček a to z vnitřního snímače ventilátoru a pomocí IR senzoru. Taktéž je zde vidět průběh otáček při jednotlivých měřeních.



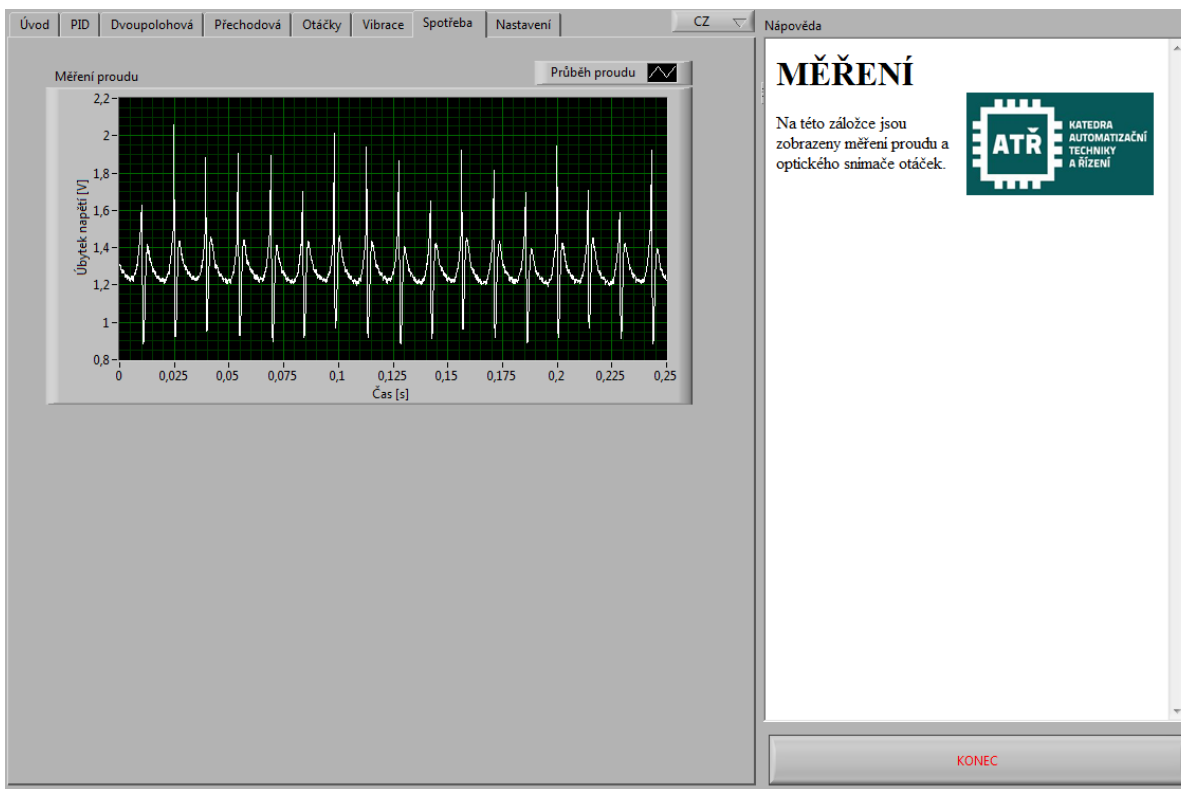
- měření vibrací (obr. 8)



Obr. 8 – Měření vibrací ventilátoru

V záložce *Vibrace* obslužné aplikace je prováděna vizualizace měření vibrací, které získáváme z akcelerometru, který je umístěn na ventilátoru. V levém sloupci, je vidět průběhy akcelerace v osách  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a taky, v pravém sloupci je vykreslováno power spektrum, které bylo získáno pomocí FFT.

- měření úbytku napětí (obr. 9)



Obr. 9 – Měření spotřeby ventilátoru

V záložce *Spotřeba* obslužné aplikace je vidět závislost úbytku napětí na ventilátoru na čase.

## 2 Identifikace modelu

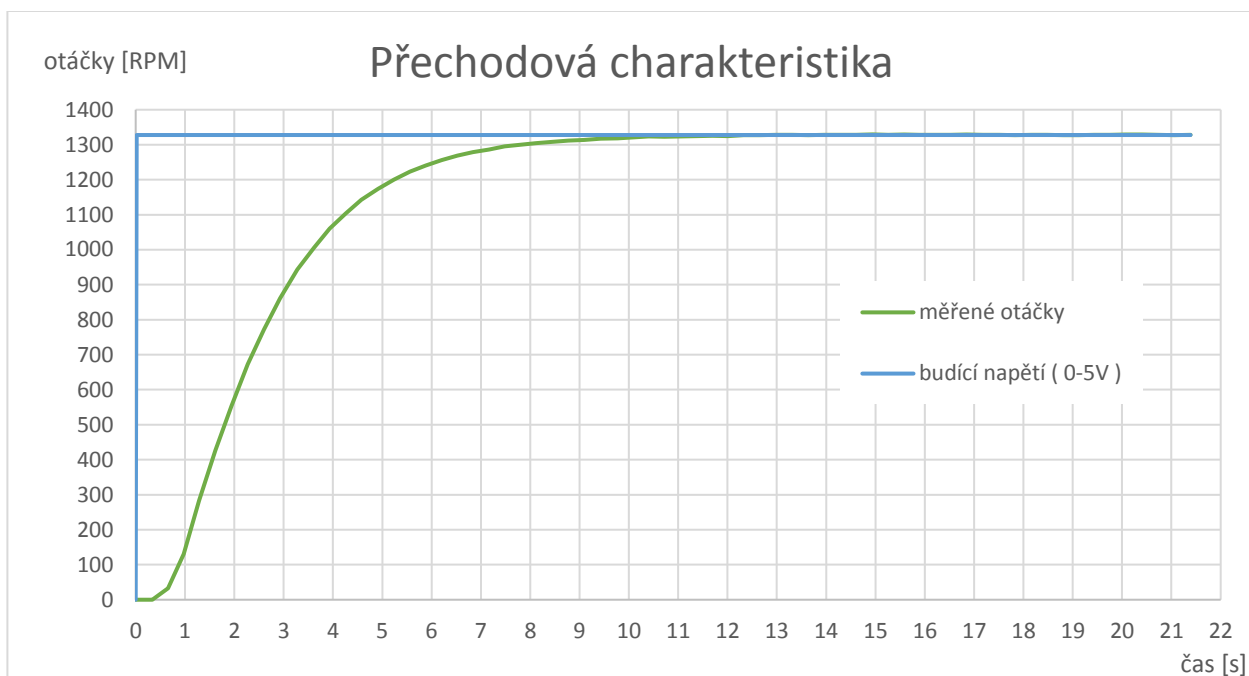
Identifikace systému pomocí aproximace změřené přechodové charakteristiky patří mezi deterministické metody, u kterých odvození vychází z analytického rozboru odezvy proporcionálních přenosových členů. Pro použití těchto metod, je vhodné, ať výstupní signál soustavy není zkreslen náhodným šumem. Použití těchto metod vyžaduje znalost odezvy základních typů soustav na deterministické testovací signály (v našem případě skoková změna).

Na *obr. 10* je vidět naměřená přechodová charakteristika modelu ventilátoru, při nastavení velikosti akční veličiny na 5V. Měření bylo provedeno 5x pro zvýšení přesnosti měření a eliminaci možných chyb. Výpočtem jsem zjistil, že obslužný program provádí vzorkování každých 0,32s a celkový rozptyl časů, při mých 5 měřeních, byl 0,000406s, což dělá 0,13%. Z toho je patrné, že data nejsou ekvidistantní. Ze získaných dat jsem spočítal pro každé vzorkování průměr jak časů, tak měřených otáček.

Když se zamyslíme nad fyzikální podstatou ventilátoru, dojdeme k závěru, že se jedná o rotační pohyb tělesa o momentu setrvačnosti  $J$  popsany rovnicí:

$$J\ddot{\varphi} = \sum M \quad (1)$$

z této rovnice je a přechodové charakteristiky je patrné, že se jedná o proporcionální systémem 2. řádu.



Obr. 10 – přechodová charakteristika modelu ventilátoru

Provedeme aproximaci pomocí dvou bodů odezvy a tím získáme náhradní přenos regulované soustavy se setrvačností 1. řádu s dopravním zpožděním.

Náhradní přenos bude mít tvar (Vítečková, 2008):

$$G_s(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-T_d s} \quad (2)$$

kde je  $k_1$  - zesílení,  $T_1$  - časová konstanta a  $T_d$  - dopravní zpoždění. Parametr  $k_1$  bude pro buzení soustavy jednotkovým skokem roven přenosu v ustáleném stavu. V našem případě je roven:

$$k_1 = \frac{y(\infty)}{u(\infty)} = \frac{1372}{5} = 265,5 \quad (3)$$

Z grafu přechodové charakteristiky odečteme hodnoty  $y_{0,7} = 0,7h_s(\infty)$ ,  $y_{0,33} = 0,33h_s(\infty)$  a jim odpovídající časy  $t_{0,7}$ ,  $t_{0,33}$ . Já využil Excelu a v něm provedl výpočet těchto hodnot. Avšak hodnoty  $0,7h_s(\infty)$  a  $0,33h_s(\infty)$  padly mimo naměřené hodnoty a tak jsem provedl lineární aproximaci křivky mezi nejbližšími body. Tím jsem získal požadované hodnoty  $0,7h_s(\infty)$ ,  $0,33h_s(\infty)$  a jim odpovídající časy  $t_{0,7}$  a  $t_{0,33}$ .

Při aproximaci využijeme faktu, že pokud dva body protne přímkou, tak přímka mezi nimi bude mít pořád stejný sklon  $m$  i pro body na ni ležící. Tím získáme aproximační vztah (3).

$$m = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} = \frac{y_x - y_1}{t_x - t_1} \Rightarrow t_x = \frac{y_x - y_1}{y_2 - y_1} (t_2 - t_1) + t_1 \quad (4)$$

$$y_{\infty} = 1372 \quad (5)$$

$$y_{0,7} = 0,7y_{\infty} = 0,7 \cdot 1372 = 929 \text{ RPM} \Rightarrow t_{0,7} = 3,22s \quad (6)$$

$$y_{0,33} = 0,33y_{\infty} = 0,33 \cdot 1372 = 438 \text{ RPM} \Rightarrow t_{0,33} = 1,64s \quad (7)$$

Konstanty  $T_l$  a  $T_d$  určíme podle vztahů (Vítečková, 2008):

$$T_l = 1,245(t_{0,7} - t_{0,33}) = 1,245(3,22 - 1,64) = 1,96s \quad (8)$$

$$T_{d1} = 1,498 t_{0,33} - 0,498 t_{0,7} = 1,498 \cdot 1,64 - 0,498 \cdot 3,22 = 0,86s \quad (9)$$

Dosazením do vztahu (1) pro náhradní přenos a získáme výsledný přenos proporcionální regulované soustavy se setrvačností 1. řádu s dopravním zpožděním:

$$G_s(s) = \frac{k_1}{T_1s+1} e^{-T_{d1}s} = \frac{265,5}{1,96s+1} e^{-0,86s} \quad (10)$$

Provede aproximaci pro získání náhradního přenosu proporcionální regulované soustavy se setrvačností 2. řádu s dopravním zpožděním

Náhradní přenos bude mít tvar (Vítečková, 2008):

$$G_s(s) = \frac{k_1}{(T_2s+1)^2} e^{-T_{d2}s} \quad (11)$$

Konstanty  $T_2$  a  $T_{d2}$  určíme podle vztahů (Vítečková, 2008):

$$T_2 = 0,794(t_{0,7} - t_{0,33}) = 0,794(3,22 - 1,64) = 1,25s \quad (12)$$

$$T_{d2} = 1,937 t_{0,33} - 0,937 t_{0,7} = 1,937 \cdot 1,64 - 0,937 \cdot 3,22 = 0,17s \quad (13)$$

Dosazením do vztahu (10) pro náhradní přenos získáme výsledný přenos proporcionální regulované soustavy se setrvačností 2. řádu s dopravním zpožděním:

$$G_s(s) = \frac{k_1}{(T_2s+1)^2} e^{-T_{d2}s} = \frac{265,5}{(1,25s+1)^2} e^{-0,17s} \quad (14)$$

Provedeme aproximaci pomocí 3 bodů přechodové charakteristiky. Přechodovou charakteristiku aproximujeme přenosem ve tvaru (Slovák a Riedl, 2017):

$$G_s(s) = \frac{k_1}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-T_d s} \quad (15)$$

Z grafu přechodové charakteristiky (obr. 10) odečteme hodnoty  $y_{0,7} = 0,7h_s(\infty)$ ,  $y_{0,26} = 0,26h_s(\infty)$ ,  $y_{0,09} = 0,09h_s(\infty)$  a jim odpovídající časy  $t_{0,7}$ ,  $t_{0,26}$ ,  $t_{0,09}$

$$y_{\infty} = 1372 \quad (16)$$

$$y_{0,7} = 0,7y_{\infty} = 0,7 \cdot 1372 = 929 \text{ RPM} \Rightarrow t_{0,7} = 3,22s \quad (17)$$

$$y_{0,26} = 0,26y_{\infty} = 0,26 \cdot 1372 = 345 \text{ RPM} \Rightarrow t_{0,26} = 1,42s \quad (18)$$

$$y_{0,09} = 0,09y_{\infty} = 0,09 \cdot 1372 = 119 \text{ RPM} \Rightarrow t_{0,09} = 0,94s \quad (19)$$

Dopravní zpoždění  $T_d$  určíme podle vztahu:

$$T_d = 2 t_{0,09} - t_{0,26} = 2 \cdot 0,94 - 1,42 = 0,45s \quad (20)$$

Vypočítáme koeficienty  $B$  a  $C$  podle vzorců:

$$\begin{aligned} B &= 0,83 \cdot t_{0,7} - 0,24 \cdot t_{0,26} + 0,48 \cdot t_{0,09} - T_d = \\ &= 0,83 \cdot 3,22 - 0,24 \cdot 1,42 + 0,48 \cdot 0,94 - 0,45 = 2,33 \end{aligned} \quad (21)$$

$$C = 4 \cdot (t_{0,26} - t_{0,09})^2 = 4 \cdot (1,42 - 0,94)^2 = 0,94 \quad (22)$$

Konstanty  $k_l$ ,  $T_l$  a  $T_2$  určíme podle vztahů:

$$T_1 = \frac{B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot C}}{2} = \frac{2,33 + \sqrt{2,33^2 - 4 \cdot 0,94}}{2} = 1,8s \quad (23)$$

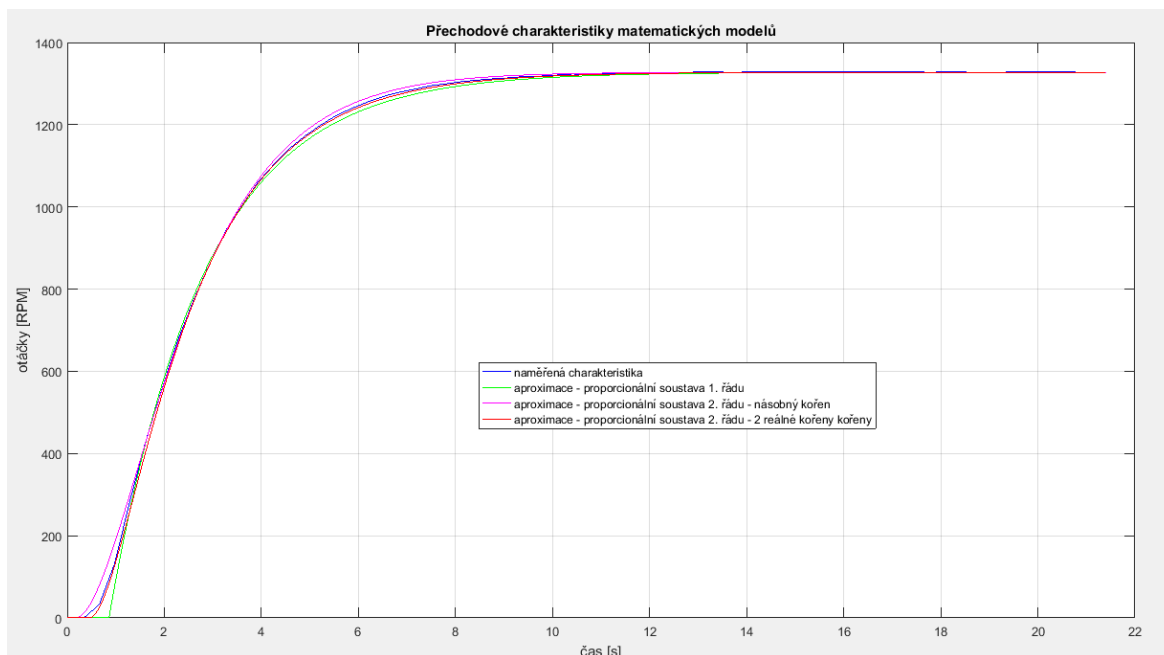
$$T_2 = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot C}}{2} = \frac{2,33 - \sqrt{2,33^2 - 4 \cdot 0,94}}{2} = 0,53s \quad (24)$$

$$k_1 = \frac{y(\infty)}{u(\infty)} = \frac{1372}{5} = 265,5 \quad (25)$$

Dosazením do vztahu (14) pro náhradní přenos získáme výsledný přenos proporcionální regulované soustavy se setrvačností 2. řádu s dopravním zpožděním:

$$G_s(s) = \frac{k_1}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-T_d s} = \frac{265,5}{(1,8s+1)(0,53s+1)} e^{-0,45s} \quad (26)$$

Pomocí programu Matlab od společnosti MathWorks jsem provedl simulaci odezvy aproximovaných přenosů (9), (10) a (25) na skokovou změnou vstupního signálu z 0 na 5V. Grafické znázornění výsledných průběhů je na *obr. 11*.



Obr. 11 - grafy přechodových charakteristik náhradních přenosů regulované soustavy

Nyní provedeme výpočet přiléhavosti křivek  $S_e$ , pomocí které vyhodnotíme přesnost jednotlivých aproximací. Přiléhavost se počítá podle vzorce

$$S_e = \sum e^2 \quad (27)$$

kde je  $S_e$  - přiléhavost,  $e^2$  - odchylka naměřené a aproximované hodnoty přechodové charakteristiky.

Pro náhradní přenos proporcionální soustavy se setrvačností 1. řádu s dopravním zpožděním (9) získáme:

$$S_{e1} = \sum e^2 = 7990 \quad (28)$$

Pro náhradní přenos proporcionální soustavy se setrvačností 2. řádu s dopravním zpožděním a násobným kořenem (10) získáme:

$$S_{e2} = \sum e^2 = 6473 \quad (29)$$

Pro náhradní přenos proporcionální soustavy se setrvačností 2. řádu s dopravním zpožděním a reálnými kořeny (25) získáme:

$$S_{e3} = \sum e^2 = 1931 \quad (30)$$

Z čehož plyne, že nejpřesnější metoda aproximace je pomocí přenosu (25).

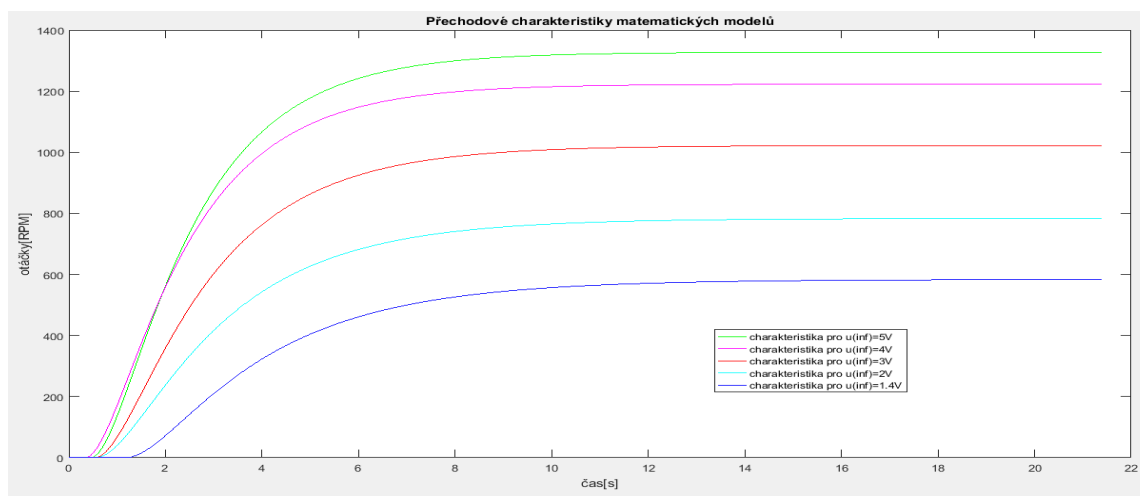
Dále jsem provedl aproximaci 3 bodovou metodou (25) pro buzení vstupu skokovou změnou o velikosti 1.4V, 2V, 3V, 4V a 5V.

Tím jsem získal následující vztahy pro přenos soustav:

Tabulka 1 - Rovnice soustavy pro různá budící napětí

$u_{\infty} [V]$	Vypočítané přenosy
1,4	$G_s(s) = \frac{k_1}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-T_d s} = \frac{116,70}{(2,63s+1)(0,64s+1)} e^{-1,17s}$ (31)
2	$G_s(s) = \frac{k_1}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-T_d s} = \frac{156,62}{(2,31s+1)(0,63s+1)} e^{-0,55s}$ (32)
3	$G_s(s) = \frac{k_1}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-T_d s} = \frac{204,43}{(2,03s+1)(0,58s+1)} e^{-0,53s}$ (33)
4	$G_s(s) = \frac{k_1}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-T_d s} = \frac{244,61}{(1,82s+1)(0,52s+1)} e^{-0,34s}$ (34)
5	$G_s(s) = \frac{k_1}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-T_d s} = \frac{265,53}{(1,8s+1)(0,53s+1)} e^{-0,45s}$ (35)

Grafy přechodových charakteristik pro výše uvedené soustavy:



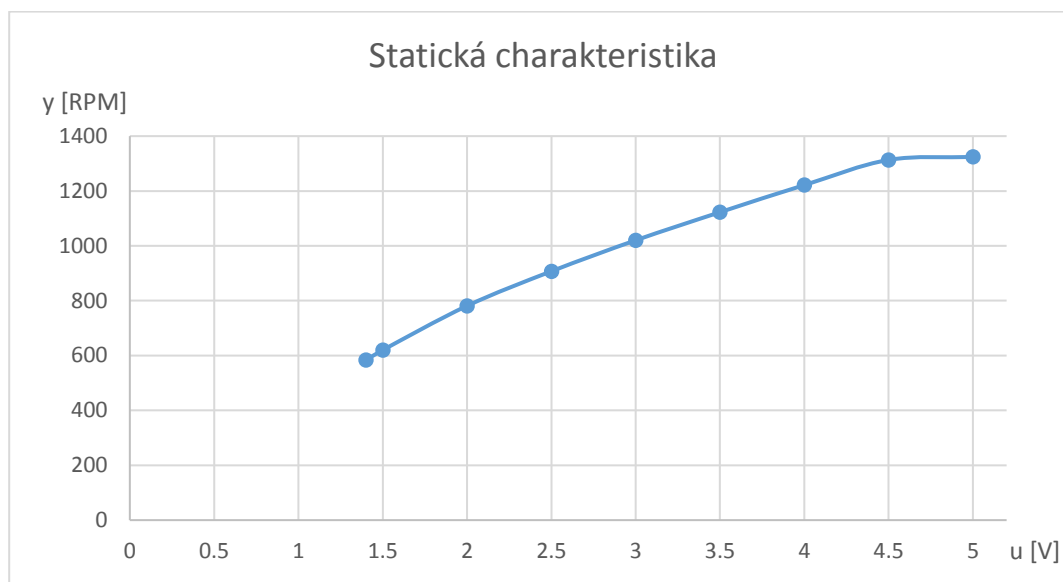
Obr. 12 - Přechodové charakteristiky pro různá budící napětí

Z výše uvedených rovnic (30) – (34) je patrné, že pro rostoucí vstupní napětí nám roste parametr  $k_l$ , který udává zesílení soustavy a tím i maximální otáčky ventilátoru – čím větší vstupní napětí, tím větší otáčky. Dále je zde patrné, že s rostoucím napětím klesá doba, za kterou se ventilátor



roztočí na otáčky dané vstupním napětím – tento stav ovlivňují parametry  $T_1$  a  $T_2$ . Rostoucí vstupní napětí též snižuje dopravní zpoždění  $T_d$ , které oddaluje reakci ventilátoru.

Z přechodových charakteristik pro různá budící napětí jsem sestrojil statickou charakteristiku soustavy (*obr. 13*) – závislost výstupní veličiny soustavy (otáček) na vstupní veličině soustavy (elektrické napětí). Charakteristika je nelineární, což je patrné především v oblasti  $u = 4,5 - 5V$ . Pod úrovní  $u=1,4V$  je ventilátor necitlivý na buzení. Toto je dáno tím, že ventilátor obsahuje elektroniku, která potřebuje pro svůj provoz minimální napětí.



*Obr. 13 – Statická charakteristika modelu ventilátoru*

### 3 Návrh regulátoru

V předchozí kapitole jsme provedli identifikaci soustavy a nyní přistoupíme k volbě regulátoru a výpočtu jeho parametrů. Pro identifikovanou proporcionální soustavu se setrvačností 2. řádu s dopravním zpožděním, provedeme seřízení pomocí metody požadovaného modelu a metodou SIMC.

#### 3.1 Návrh regulátoru metodou požadovaného modelu

Metoda je analytická pro snadné a rychlé seřízení konvenčních regulátorů pro základní druhy regulovaných soustav i s dopravním zpožděním.

Pro naši soustavu s přenosem

$$G_s(s) = \frac{k_1}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-T_d s} = \frac{265,5}{(1,8s+1)(0,53s+1)} e^{-0,45s} \quad (36)$$

nám metoda doporučí regulátoru typu PID s přenosem

$$G_R(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (37)$$

Překmit  $\kappa$  volím 5%, z čehož plyne, že parametr  $\beta = 1,944$ .

Hodnoty konstant  $k_I$ ,  $T_d$ ,  $T_I$  a  $T_2$  použijeme ze vztahů (19), (22), (23) a (24).

$$T_I^* = T_1 + T_2 = 1,8 + 0,53 = 2,33s \quad (38)$$

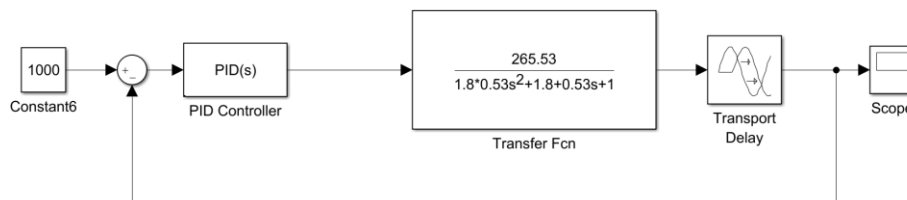
$$T_D^* = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} = \frac{1,8 \cdot 0,53}{1,8 + 0,53} = 0,41s \quad (39)$$

$$k_p^* = \frac{T_I^*}{\beta \cdot T_d \cdot k_1} = \frac{2,33}{1,944 \cdot 0,45 \cdot 265,53} = 0,01 \quad (40)$$

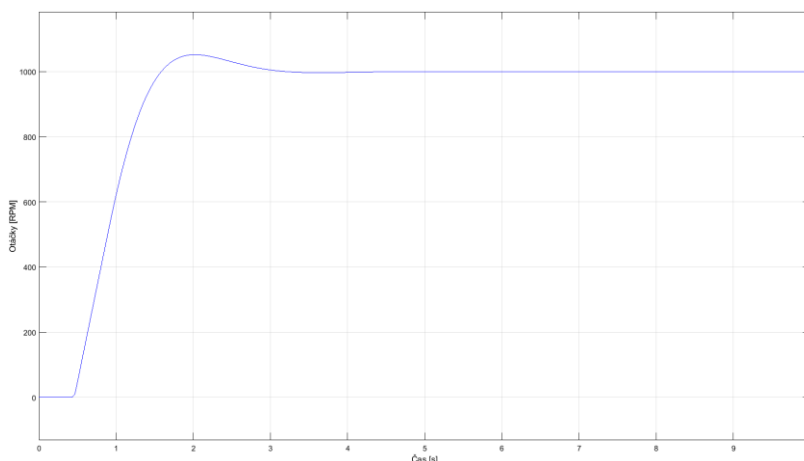
Dosazením do vztahu (36) získáme přenos regulátoru:

$$G_R(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = 0,01 \cdot \left( 1 + \frac{1}{2,33s} + 0,41s \right) \quad (41)$$

Pro verifikaci výsledků jsem provedl simulaci v programu Simulink



Obr. 14 – simulační model regulátoru a soustavy



Obr. 15 – výstupní signál regulované soustavy

## 3.2 Návrh regulátoru metodou SIMC

Metoda patří mezi jednoduché a velmi účinné metody pro syntézu analogových regulátorů. Vychází z regulace s interním modelem – IMC (internal model control). Autor Prof. Sigurd Skogestad navrhl zkratku SIMC vykládanou jako „SIMple Control“ nebo „Skogestad IMC“.

Pro naši soustavu s přenosem (25) nám metoda doporučí regulátoru typu PID nebo PID<sub>i</sub>. Volím regulátor PID s přenosem

$$G_R(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (42)$$

Nejprve provedeme zhodnocení, zda je  $T_1 \leq 8 \cdot T_d$ , které nám určí, jaké vztahy máme vybrat pro výpočet parametrů  $k_p^*$ ,  $T_I^*$  a  $T_D^*$ . Nerovnost platí, tak jak je zapsaná. Hodnoty konstant  $k_I$ ,  $T_d$ ,  $T_1$  a  $T_2$  použijeme ze vztahů (19), (22), (23) a (24).

$$k_p^* = \frac{T_1 + T_2}{2 \cdot k_1 \cdot T_d} = \frac{1,8 + 0,53}{2 \cdot 265,53 \cdot 0,45} = 0,01 \quad (43)$$

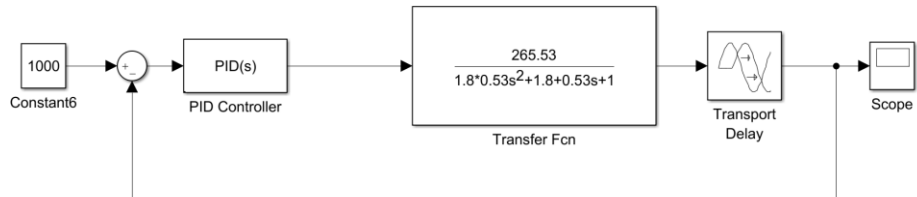
$$T_I^* = T_1 + T_2 = 1,8 + 0,53 = 2,33s \quad (44)$$

$$T_D^* = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} = \frac{1,8 \cdot 0,53}{1,8 + 0,53} = 0,41s \quad (45)$$

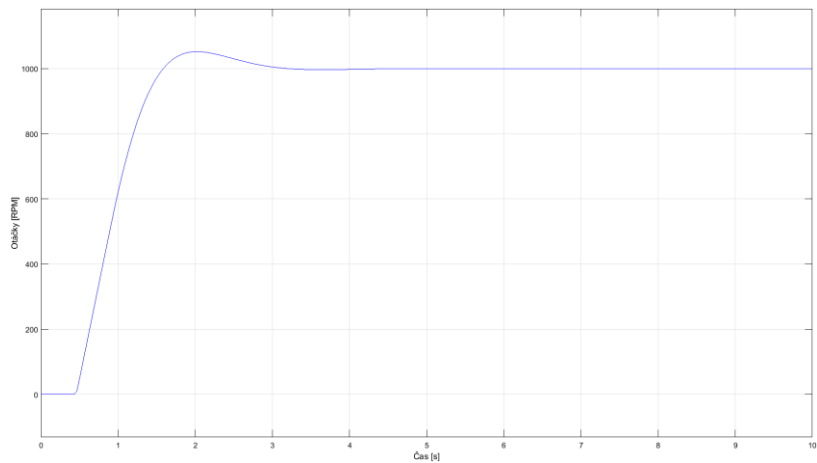
Přenos seřízeného regulátoru dostaneme dosazením do vztahu (41)

$$G_R(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = 0,01 \left( 1 + \frac{1}{2,33s} + 0,41s \right) \quad (46)$$

Pro verifikaci výsledků jsem provedl simulaci v programu Simulink:



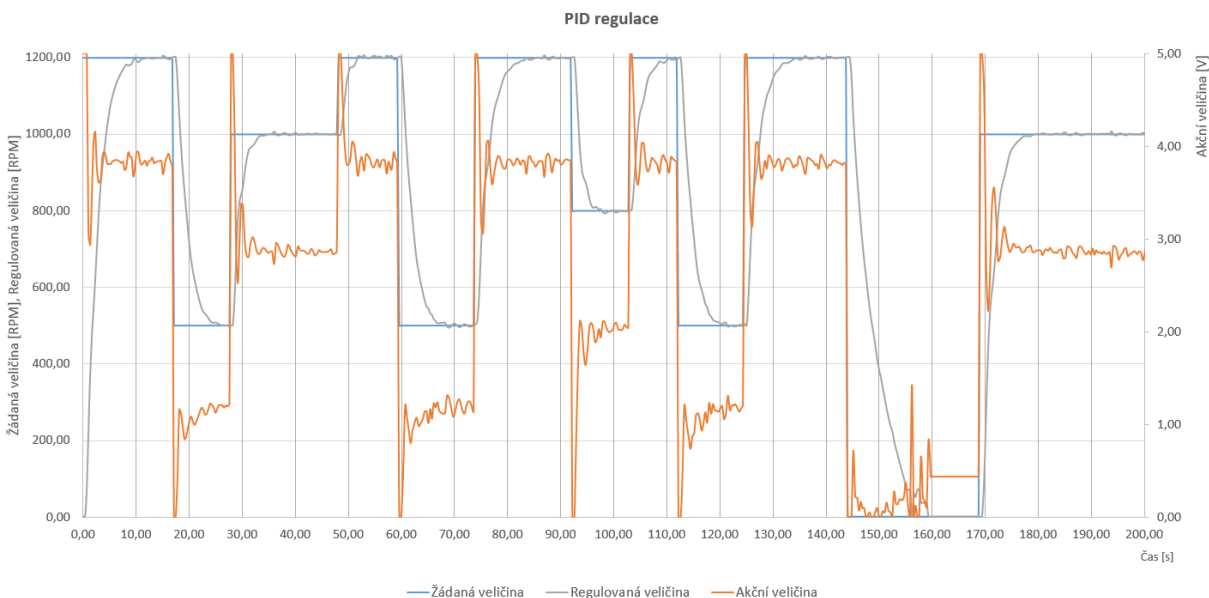
Obr. 16 – simulační model regulátoru a soustavy



Obr. 17 – výstupní signál regulované soustavy

### 3.3 Ověření PID regulace

V obslužném programu jsem ověřil navržené regulátory – graf je pouze jeden, protože hodnoty regulátoru jsou totožné. V grafu akční veličiny jsou pro větší názornost hodnoty vynásobeny 240. Při změně žádané veličiny je vidět okamžitá změna akční veličiny. Důsledkem této změny je povolená změna regulované veličiny. Na grafu je vidět, jak se otáčky ustálí na žádané hodnotě, čím jsme si ověřili, že návrh regulátoru byl správný.



Obr. 18 Grafické znázornění PID regulace

## 4 Závěr

Cílem projektu bylo, připravit podporu výuky předmětu Základy automatizace, což v mém případě znamenalo, seznámit se s laboratorním modelem ventilátoru, který jsem popsal a ověřil jeho funkčnost.

V rámci popisu programového vybavení modelu jsem nastínil i teoretické pozadí dané úlohy, čímž jsem studentovi umožnil propojení, teoretické přípravy s praktickým použitím. Tímto získá jasnější představu o tom, k čemu může získané znalosti použít.

Model ventilátoru studentovi umožní, prakticky si vyzkoušet identifikaci soustavy, provedení návrhu regulátoru. Následně si může výsledky ověřit v simulačním programu a reálně ověřit na modelu. Všechny uvedené kroky jsem prošel a sestavil ilustrativní výsledky.

Prvním krokem byla identifikace soustavy. Z grafu přechodové charakteristiky (obr. 10) bylo patrné, že se jedná o proporcionální soustavu s dopravním zpožděním. S přihlédnutím k fyzikální podstatě (rotační pohyb) nebylo pochyb, že soustava je 2. řádu. Pro identifikaci jsem použil 3 metody – aproximaci proporcionální soustavou se setrvačností 1. řádu s dopravním zpožděním (9), proporcionální soustavou se setrvačností 2. řádu s dopravním zpožděním a násobným kořenem (10) a proporcionální soustavou se setrvačností 2. řádu s dopravním zpožděním a reálnými kořeny (25). Po výpočtu přiléhavosti aproximovaných soustav jsem dospěl k závěru, že nejlepších výsledků dosáhla aproximace proporcionální soustavou se setrvačností 2. řádu s dopravním zpožděním a reálnými kořeny a ta byla použita k dalším výpočtům.

Po zvolení aproximační metody jsem provedl aproximaci přechodových charakteristik pro různá budicí napětí (1.5V, 2V, 3V, 4V a 5V), čímž jsem získal celkově 5 rovnic pro přenos soustavy. Z takto získaných vztahů jsem v simulačním programu Matlab sestrojil graf, který znázorňuje průběh všech 5 přechodových charakteristik (obr. 12). Z těchto charakteristik jsem sestrojil statickou charakteristiku soustavy a to tak, že jsem pro každé budicí napětí zapsal hodnotu ustáleného stavu a takto získané hodnoty vynesl do grafu (obr. 13). Z grafu je patrná necitlivost soustavy do budicího napětí 1,4V a nelineární průběh, který je znatelný v oblasti okolo 1300RPM.

Po zdárné identifikaci soustavy jsem mohl přistoupit k návrhu regulátoru, kde jsem zvolil metodu požadovaného modelu a metodu SIMC. Obě metody jsem ověřil simulací v simulačním programu Matlab – Simulink.

Seřízení regulátoru jsem ověřil na reálném modelu. Výsledky regulace jsou na Obr. 18, kde je vidět, že po změně žádané hodnoty otáček se regulované otáčky ustálí na žádané hodnotě.

Součástí práce bylo i zhotovení návodu do cvičení v českém a anglickém jazyce. V nichž je student postupně veden všemi, v práci popsány a změřenými, postupy – od změření přechodové charakteristiky, přes její identifikaci, aproximaci a sestavení matematického modelu až po navržení a seřízení regulátoru, i s ověřením regulace na reálném modelu.

## Použitá literatura

- DORF, R. C. & BISHOP, R. H. Modern Control Systems. Addison-Wesley: Harlow England 1998. ISBN 0-201-30864-9.
- FARANA, Radim, SMUTNÝ, Lubomír, VÍTEČEK, Antonín, VÍTEČKOVÁ, Miluše a WAGNEROVÁ, Renata. Doporučení pro psaní odborných textů z oblasti automatizace a informatiky. Skripta FS VŠB-TU Ostrava, 2008, 80 str. ISBN 978 - 80 - 248 - 1925 – 9
- HÝL, M. Návrh a realizace řízení modelu Batyskaf. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 2013. 41 stran. Bakalářská práce, vedoucí: Wagnerová, R.
- LOS, J. Analýza a syntéza vybraného technologického procesu. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 2007. Bakalářská práce, vedoucí: Wagnerová, R.
- NOSKIEVIČ, P. 1999. Modelování a identifikace systému. Ostrava: Vydavatelství MONTANEX a.s. 1999. 276 s. ISBN 80-7225-030-2.
- NOSKIEVIČ, P. 1992. Simulace systému. VŠB TU Ostrava, 217 s. ISBN 80-7078-112-2.
- SLOVÁK, Tomáš a RIEDL Zdeněk, Identifikace a syntéza řízení technologických procesů [online]. [cit. 2017-01-30]. Dostupné z: [http://www.352.vsb.cz/uc\\_texty/Identifikace/index.htm](http://www.352.vsb.cz/uc_texty/Identifikace/index.htm)
- ŠVARC, I., ŠEDA, M., VÍTEČKOVÁ, M. Automatické řízení. Akademické nakladatelství CERM, VUT v Brně, Brno 2007
- VÍTEČKOVÁ, M. Slovník L- a Z- transformace s řešenými příklady. Fakulta strojní VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2005
- VÍTEČKOVÁ, M., VÍTEČEK, A. Základy automatické regulace. 2. přepracované vydání. Skripta FS VŠB-TU Ostrava, 246 str. 2008. ISBN 978-80-248-1924-2.



## **Přílohy**